

UNIVERSITÉ DE GENÈVE
Département de biologie animale.

UNIVERSITÉ DE GENÈVE
Département de morphologie
(Division 1)

FACULTÉ DES SCIENCES
Professeur H.J. HUGGEL

FACULTÉ DE MÉDECINE
Professeur C.A. BAUD

LA STRUCTURE ET LA MINÉRALISATION DE L'ÉCAILLE DE QUELQUES POISSONS TÉLÉOSTÉENS

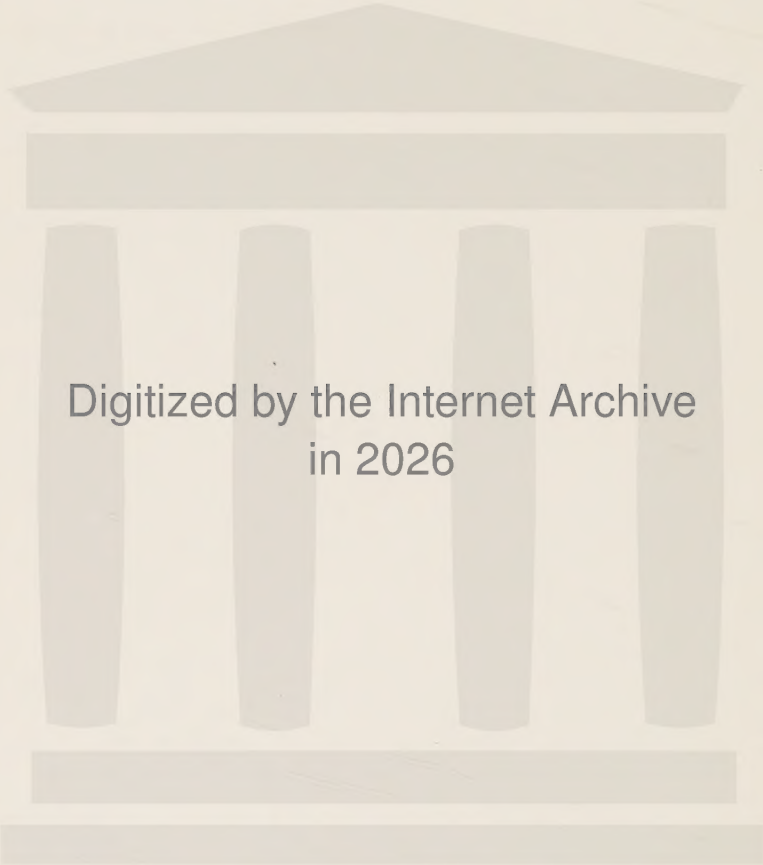
THÈSE
présentée à la Faculté des Sciences
de l'Université de Genève
pour obtenir le grade de docteur en sciences biologiques

par
Anni Aleida SCHÖNBÖRNER
de
PRETORIA (Afrique du Sud)

Thèse N° 1856

Genève
Service Rapide Offset
1978

Texte condensé de la thèse N° 1856, approuvée par la Faculté des sciences. Des copies en microfilms du texte complet peuvent être obtenues auprès de la Bibliothèque publique et universitaire de Genève. Le texte complet peut être consulté à cette bibliothèque ou à la Bibliothèque nationale suisse à Berne.



Digitized by the Internet Archive
in 2026

UNIVERSITÉ DE GENÈVE
Département de biologie animale.

UNIVERSITÉ DE GENÈVE
Département de morphologie
(Division 1)

FACULTÉ DES SCIENCES
Professeur H.J. HUGGEL

FACULTÉ DE MÉDECINE
Professeur C.A. BAUD

LA STRUCTURE ET LA MINÉRALISATION DE L'ÉCAILLE DE QUELQUES POISSONS TÉLÉOSTÉENS

THÈSE
présentée à la Faculté des Sciences
de l'Université de Genève
pour obtenir le grade de docteur ès sciences biologiques

par
Anni Aleida SCHÖNBÖRNER
de
PRETORIA (Afrique du Sud)

Thèse N° 1856

Genève
Service Rapide Offset
1978

Texte condensé de la thèse N° 1856, approuvée par la Faculté des sciences. Des copies en microfilms du texte complet peuvent être obtenues auprès de la Bibliothèque publique et universitaire de Genève. Le texte complet peut être consulté à cette bibliothèque ou à la Bibliothèque nationale suisse à Berne.

La Faculté des Sciences, sur le préavis de Messieurs H. HUGGEL, professeur ordinaire et C.A. BAUD, professeur ordinaire (Département de Morphologie – Faculté de Médecine) codirecteurs de thèse et Madame LOPEZ (sous-directeur du Musée national d'histoire naturelle – Paris) autorise l'impression de la présente thèse, sans exprimer d'opinion sur les propositions qui y sont énoncées.

Genève, le 7 février 1978

Le doyen
Bernard LEVRAT

Thèse N° 1856



Le présent travail a été effectué à l'Institut de Morphologie (Directeur: Professeur C.A. BAUD) de la Faculté de Médecine de l'Université de GENEVE.

Je remercie tout particulièrement Monsieur le Professeur C.A. BAUD de la confiance qu'il me témoigna en m'offrant un poste d'assistant dans son Institut. Après m'avoir proposé le sujet de cette thèse, Monsieur le Professeur BAUD n'a cessé de me prodiguer ses précieux conseils et c'est avec une constante bienveillance qu'il me guida tout au long de ce travail. Qu'il trouve ici l'expression de ma gratitude et de ma profonde et respectueuse admiration.

Monsieur le Professeur H.J. HUGGEL (Directeur du Laboratoire d'Anatomie et de Physiologie Comparées de la Faculté des Sciences de l'Université de GENEVE) m'a fait bénéficier de ses précieux conseils et m'a fait l'honneur d'accepter la présidence du jury. Qu'il veuille bien trouver ici le témoignage de mes sincères remerciements et de ma respectueuse reconnaissance.

Madame E. LOPEZ (Sous-Directeur du Laboratoire de Physiologie Générale et Comparée du Muséum National d'Histoire Naturelle de PARIS, France) a bien voulu accepter de juger ce travail, après m'avoir fait part de ses précieux commentaires issus de sa grande expérience. Je lui adresse mes plus vifs remerciements.

Que tous les collaborateurs de l'Institut de Morphologie trouvent ici l'expression de ma reconnaissance pour l'intérêt qu'ils ont témoigné à mon travail et pour leurs conseils amicaux. Je remercie particulièrement: le Docteur G. BOIVIN pour ses conseils et sa précieuse contribution à la correction du texte français.

TABLE DES MATIERES

INTRODUCTION	1
MATERIEL ET METHODES	2
- Extraction de la matière organique	2
- Microscopie en lumière polarisée	2
- Microscopie électronique (ME)	2
- ME par transmission	2
- ME à balayage	3
- Diffraction des rayons X et diffraction électronique	3
- Microradiographie qualitative et quantitative	3
- Protocole de la résorption expérimentale	4
- L'analyse par spectroscopie infrarouge	4
RESULTATS	5
- Le processus de minéralisation	5
- Morphologie ultrastructurale	5
- Corpuscules de MANDL	6
- Examen en lumière polarisée	6
- Morphologie ultrastructurale	7
- ME par transmission	7
- ME à balayage	7
- Analyse par diffraction des rayons X et diffraction électronique	8
- Analyse par microradiographie	8
- La résorption expérimentale	9
- Examen en microscopie optique et à l'aide de microradiographies	9
- L'analyse par spectroscopie infrarouge	10
- Examen en ME	10
- ME à balayage	10
- ME par transmission	10
DISCUSSION	11
- Le processus de la minéralisation	11
- Aspects ultrastructuraux	11
- Corpuscules de MANDL	12
- Examen en lumière polarisée	12
- Aspects ultrastructuraux	13
- Aspects biophysiques	13
- La résorption expérimentale	14
CONCLUSIONS	15
BIBLIOGRAPHIE	17

INTRODUCTION

Sous ce titre général nous avons considéré plus spécialement les trois problèmes suivants:

- 1) les aspects ultrastructuraux de la minéralisation de l'écaille;
- 2) l'ultrastructure et la composition de la substance minérale des calcifications (appelées corpuscules de MANDL) présentes dans la couche interne de l'écaille;
- 3) les phénomènes de résorption des tissus calcifiés de l'écaille.

Chez les Poissons Téléostéens la croissance et la minéralisation de l'écaille sont continues. Une question se pose alors: cette minéralisation s'effectue-t-elle par l'intermédiaire de vésicules et/ou par une nucléation hétérogène?

Dans l'écaille, on admet classiquement qu'il y a deux types de minéralisation: inotrope et sphéritique. Dans une minéralisation inotrope, les cristaux de minéral sont orientés le long des fibrilles de la trame organique. Dans une minéralisation sphéritique, les cristaux se disposent radiairement autour d'un centre, comme on l'observe dans les globules de la dentine des Mammifères. En lumière polarisée les globules de la dentine et les corpuscules de MANDL montrent des croix de polarisation. Le problème était de savoir si dans un corpuscule, les cristaux sont radiairement disposés autour d'un centre.

Les écailles ont une fonction de protection mais jouent-elles aussi un rôle dans le métabolisme du poisson? Y a-t-il une résorption des tissus calcifiés de l'écaille assurant une mobilisation du calcium en cas de besoin?

MATERIEL ET METHODES

Les observations ont été effectuées sur les écailles de diverses espèces de Téléostéens, le poisson rouge (Carassius auratus L.), le gardon (Rutilus rutilus L.), le guppy (Lebistes reticulatus Peters), la perche soleil (Eupomotis gibbosus L.) et Tilapia rendalli Boulenger.

Extraction de la matière organique

La matière organique a été extraite d'écailles fixées dans l'alcool, soit par l'action de l'éthylène-diamine, du glycérol alcalinisé ou de l'hydrazine, soit par incinération à haute ou basse température.

Microscopie en lumière polarisée

Pour l'observation au microscope polarisant, les écailles et les corpuscules de MANDL, avec leur trame organique ou après extraction de la matière organique, sont préparés soit entiers, soit débités en sections parallèles ou perpendiculaires à la surface de l'écaille. Les préparations sont soit incluses dans l'épon, soit montées dans le fluormount ou le bromoforme.

Microscopie électronique (ME)

ME par transmission

Les écailles prélevées sur des poissons anesthésiés au MS 222 sont fixées soit par du KMnO_4 à 1,3%, tamponné avec du véronal-acétate de sodium (pH 7,4), soit par du glutaraldéhyde à 5% tamponné avec du cacodylate de sodium (pH 7,2) suivi d'une postfixation dans du tétraoxyde d'osmium à 1% (même tampon, pH 7,2). Après fixation, les écailles sont deshydratées puis incluses dans l'épon B. Des coupes fines sont faites en utilisant un couteau de diamant et sont recueillies sur de l'eau alcalinisée pour éviter tout risque

de déminéralisation. Certaines coupes sont colorées par le citrate de plomb. Les micrographies électroniques sont réalisées à l'aide d'un microscope PHILIPS EM 200.

ME à balayage

Les écailles et les corpuscules de MANDL sont collés sur des porte objets, entourés d'une colle argentée et soumis à l'évaporation d'une couche d'or. Les micrographies électroniques sont réalisées à l'aide d'un microscope SIEMENS Autoscan.

Diffraction des rayons X et diffraction électronique

Des écailles ainsi que des corpuscules de MANDL isolés des écailles sont analysés par diffraction des rayons X (caméra de GUINIER ou de CHESLEY) et/ou par diffraction électronique en se servant d'un microscope électronique PHILIPS EM 75 équipé d'un dispositif de diffraction à haute résolution.

Microradiographie qualitative et quantitative

Des écailles fixées dans l'alcool, incluses dans le méthacrylate de méthyle, sont débitées en tranches puis sont microradiographiées. Pour la microradiographie quantitative les tranches sont usées jusqu'à une épaisseur de 100 μm et microradiographiées avec un étalon d'aluminium d'épaisseur croissante (BAUD, 1957). L'analyse quantitative des microradiographies est effectuée à l'aide d'une méthode de micro-photométrie en utilisant un histophotomètre LEITZ. Le degré de minéralisation exprimé en grammes de minéral par centimètre cube de substance calcifiée, est déterminé selon la méthode de SISSONS et coll. (1960), pour les couches limitante, externe et interne de chaque écaille, ainsi que pour les corpuscules de MANDL.

Protocole de la résorption expérimentale

Afin de provoquer une éventuelle résorption des écailles, deux procédés différents décrits dans la littérature ont été essayés. Dans une première expérience basée sur un travail de WALLIN (1957), de jeunes poissons rouges sont soumis à un régime rachitogène contenant du carbonate de strontium à 3%. Par ailleurs les animaux sont maintenus dans de l'eau dé-ionisée afin de supprimer totalement le calcium. Après 3, 6, 10 et 20 semaines, quelques poissons sont sacrifiés et un échantillonnage représentatif de 50 écailles par poisson est examiné. Quelques poissons rouges non-traités ont servi de témoins. Certains poissons rouges témoins achetés dans le commerce, ayant montré une résorption des écailles avant l'expérimentation, nous avons répété l'expérience du régime rachitogène avec des Tilapia de 6 mois, provenant d'un élevage où l'apport minéral est assuré.

Dans une deuxième expérience basée sur un travail de LOPEZ (1973), 4 Tilapia sont traités par une forte dose de thyroxine 4 (L Thyroxine-Na sel) à raison de 2 mg par litre d'eau dé-ionisée de l'aquarium; la solution est renouvelée chaque jour pendant 21 jours et les animaux sont maintenus à jeun. Quatre autres Tilapia sont maintenus à jeun dans de l'eau dé-ionisée à laquelle du calcium est ajouté sous forme de CaCl_2 , dans des proportions comparables à celles de l'eau du robinet (80 mg par litre). Les 8 Tilapia sont sacrifiés après 21 jours ainsi que 3 Tilapia témoins; 50 écailles de chaque poisson sont examinées.

L'analyse par spectroscopie infrarouge

La substance minérale des écailles de 6 poissons rouges (3 témoins et 3 soumis pendant 20 semaines au régime rachitogène) et de 7 Tilapia (3 témoins et 4 traités par

une forte dose de thyroxine 4) est analysée par spectroscopie infrarouge au moyen d'un spectromètre PERKIN ELMER 357 en utilisant la technique des disques de bromure de potassium. Nous avons évalué l'indice de cristallinité de la substance minérale des écailles selon la méthode de BLUMENTHAL et coll. (1972).

RESULTATS

Le processus de minéralisation

Morphologie ultrastructurale

Les premiers stades de la minéralisation principale s'effectue dans le tissu "ostéoïde" au niveau de la région périphérique de l'écaille. Le terme "ostéoïde" est utilisé ici pour désigner le liséré de tissu montrant les premiers stades de la minéralisation; il ne sert pas à désigner de l'os acellulaire. Dans la matrice interfibrillaire dense du tissu "ostéoïde" on observe de petites structures vésiculaires, de forme arrondie (20 à 90 nm de diamètre) et délimitées par une membrane trilaminaire. L'uniformité d'aspect de tous les profils de sections de vésicules permet d'affirmer qu'il ne s'agit pas de sections de prolongements cytoplasmiques. Dans les cellules autour de l'écaille, en contact avec le tissu "ostéoïde", on observe des vésicules ayant la même taille que celles observées dans le tissu "ostéoïde". Le premier dépôt minéral est visible dans une vésicule qui n'a plus de membrane, sous forme d'un bâtonnet opaque aux électrons et composé d'une chaîne de grains ronds. Dès ce stade les zones minéralisées s'étendent par croissance radiaire appositionnelle, de nouveaux bâtonnets se forment, sans l'intermédiaire de vésicules, au contact du premier dépôt. Progressivement les bâtonnets deviennent de longues

aiguilles cristallines.

Au début le dépôt minéral est localisé au hasard entre les fibrilles de collagène. Exceptionnellement chez le poisson rouge il forme une sorte d'hélice autour des quelques fibrilles perpendiculaires aux autres dans chaque lamelle de la couche interne. Plus tard un dépôt minéral est apparent à l'intérieur de certaines fibrilles sous forme de plaques rectangulaires, peu opaques aux électrons, aux contours très nets. Ce dépôt est disposé à intervalles réguliers dans les fibrilles renforçant ainsi la striation périodique.

Minéralisé, le tissu "ostéoïde" devient la couche externe; ainsi l'écaille s'accroît en largeur à la périphérie. La couche interne avoisinante se différencie et augmente en épaisseur par l'adjonction de lamelles successives. La minéralisation continue à s'étendre dans la couche interne.

Cette minéralisation dans la couche interne ne s'étend pas seulement par accroissement appositionnel (minéralisation inotrope) mais on observe aussi une minéralisation à partir de différents foyers formant les corpuscules de MANDL qui sont ensuite incorporés dans la masse du tissu calcifié. Lors de la formation et du développement des corpuscules, des vésicules d'origine cellulaire n'ont pas été observées.

Corpuscules de MANDL

Examen en lumière polarisée

Après extraction de la matière organique, les corpuscules de MANDL observés en lumière polarisée sur des préparations parallèles à la surface de l'écaille, montées dans le fluor-mount ou le bromoforme montrent des croix de polarisation atypiques. Dans les mêmes conditions, mais sur des préparations perpendiculaires à la surface de l'écaille, il n'y a pas de croix de polarisation visible.

Morphologie ultrastructurale

ME par transmission

La minéralisation "sphéritique" s'effectue à partir de différents foyers et forme les corpuscules de MANDL présents dans les écailles de tous les poissons étudiés. Le dépôt minéral dans les corpuscules est comparable à celui du tissu calcifié avoisinant; une orientation sphéritique des cristaux n'a pas été décelée dans les écailles des cinq espèces étudiées au ME. Ainsi nous appelons ce type de minéralisation, minéralisation "sphéritique" uniquement par référence à la forme des corpuscules. La structure lamellaire de la couche interne influence la forme des corpuscules de MANDL. Dans chaque lamelle, la minéralisation des corpuscules suit préférentiellement la direction des fibrilles de collagène.

Les écailles de guppy mettent en évidence une régularité parfaite des fibrilles de collagène dans chaque lamelle. Des corpuscules de MANDL isolés sont très rares. Dans les écailles de poisson rouge on constate des différences de structure exceptionnelles. Quelques fibrilles de collagène, montrant une disposition hélicoïdale, coupent presque perpendiculairement l'ensemble des fibrilles parallèles entre elles dans chaque lamelle. La minéralisation est plus rapide le long de ces fibrilles; elles forment les axes des corpuscules. Les corpuscules isolés sont abondants surtout au voisinage des sillons radiaires non-minéralisés où l'arrangement des fibrilles est moins régulier. Dans les écailles de Tilapia, on constate que les fibrilles de collagène ont des diamètres variables et qu'elles sont arrangées moins régulièrement. Les corpuscules de MANDL sont abondants et se forment préférentiellement dans les régions où les fibrilles sont moins denses.

ME à balayage

Les corpuscules de MANDL, partiellement dépourvus de

matière organique par l'action de l'éthylène-diamine ou du glycérol alcalinisé, paraissent globulaires et présentent une structure lamellaire. Chaque lamelle montre des fentes parallèles et l'orientation de ces fentes varie de 45 à 90° d'une lamelle à l'autre. Après extraction de la trame organique soit par l'incinération à haute ou basse température, soit par l'action de l'hydrazine, les corpuscules globulaires sont distincts mais les fentes sont moins prononcées.

Analyse par diffraction des rayons X et diffraction électronique

L'analyse par diffraction des rayons X et diffraction électronique des écailles et des corpuscules de MANDL isolés montre la présence d'apatite. Afin de tester s'il y a une orientation radiaire des cristaux dans un corpuscule, la caméra de CHESLEY est centrée sur un secteur de corpuscule. Le diagramme ainsi obtenu ne révèle aucune orientation préférentielle.

Analyse par microradiographie

Sur les microradiographies de coupes perpendiculaires à la surface des écailles on distingue une minéralisation des couches limitante et externe et d'une partie de la couche interne (en contact avec la couche externe). Les corpuscules de MANDL sont mis en évidence sur ces microradiographies sous forme de structures minéralisées, généralement de forme elliptique, soit partiellement englobées dans le tissu calcifié au niveau du front de minéralisation, soit isolées dans la couche interne. Ces corpuscules sont plus grands vers le foyer qu'à la périphérie de l'écaille.

L'analyse quantitative indique que l'ensemble des couches limitante et externe est plus fortement minéralisé que la couche interne. Chez la perche soleil, le dépôt

minéral des corpuscules de MANDL et celui de la couche interne de l'écaille ont la même densité.

La résorption expérimentale

Examen en microscopie optique et à l'aide de microradiographies

Des coupes perpendiculaires à la surface des écailles de la ligne latérale du poisson rouge et de Tilapia montrent que ces écailles sont modifiées. Ces écailles mettent en évidence une gouttière due, semble-t-il, à la résorption des couches limitante et externe et de plusieurs lamelles de la couche interne.

L'examen des écailles d'une quarantaine de poissons rouges provenant des différentes expérimentations et d'une quarantaine de Tilapia provenant d'un élevage où l'apport minéral est assuré met en évidence, chez 15% des poissons, de fortes résorptions au niveau de tissu calcifié de l'écaille. Ces résorptions sont présentes chez les poissons témoins comme chez les poissons soumis au régime rachitogène durant 3 à 20 semaines. Des ostéoclastes plurinucléés ont été identifiés au niveau des bords résorbés des écailles colorées par la fuchsine basique.

Au cours de l'examen des écailles de poisson rouge, un remaniement du tissu calcifié (une résorption suivi d'une apposition de nouveau tissu calcifié) a été observé.

Dans la première expérience, les écailles des poissons rouges et des Tilapia soumis pendant au maximum 20 et 10 semaines respectivement au régime rachitogène strontié ne montrent pas de résorption due au régime, mais on observe à la périphérie des écailles une bande de tissu "ostéoïde" nettement plus large que chez les poissons témoins.

Dans la deuxième expérience, les écailles des 3 Tilapia témoins non-traités montrent un taux normal de résorption d'environ 18%. Les 4 poissons, maintenus à jeun pendant 21 jours dans une eau dé-ionisée à laquelle du chlorure de calcium a été ajouté, mettent en évidence une forte résorption des écailles (36%). Les 4 poissons, traités durant 21 jours par une forte dose de thyroxine 4 et maintenus à jeun dans une eau dé-ionisée, révèlent une résorption des écailles plus forte encore (50%).

L'analyse par spectroscopie infrarouge

L'analyse par spectroscopie infrarouge de la substance minérale des écailles montre que, chez les 3 poissons rouges soumis au régime rachitogène pendant 20 semaines, l'indice de cristallinité est de 45, et chez les poissons rouges témoins, il est de 47. Chez les 4 Tilapia traités par une forte dose de thyroxine 4 pendant 21 jours, il est 52, et chez les 3 Tilapia témoins il est de 54. Ainsi on n'observe pas, au cours de ces traitements, de modification significative de la cristallinité de la substance minérale.

Examen en ME

ME à balayage

L'examen en ME à balayage montre que les zones et les bords des écailles en résorption se caractérisent par des contours découpés, par la disparition des crêtes et par un aspect érodé des couches limitante et externe et de plusieurs lamelles de la couche interne.

ME par transmission

L'examen des zones en résorption, sur des coupes perpendiculaires à la surface de l'écaille, montre un bord découpé, une raréfaction de la substance minérale et la présence d'ostéoclastes avec des bordures plissées qui représentent les zones actives des ostéoclastes. A

l'intérieur des cellules bordant les zones en résorption il y a des vacuoles digestives ("phagosomes") renfermant des cristaux de substance minérale. Entre les cellules et le tissu calcifié on observe parfois des fibrilles de collagène sans dépôt minéral.

DISCUSSION

Le processus de la minéralisation

Aspects ultrastructuraux

Dans l'écaille des Poissons Téléostéens la minéralisation principale par l'intermédiaire de vésicules semble être un processus permanent. C'est différent de ce qui se passe chez les Mammifères, chez lesquels la formation des vésicules n'est observée que dans les stades tout à fait initiaux de la minéralisation. KOBAYASHI et coll. (1972) ont déjà relaté la présence de vésicules ou particules dans la zone "ostéoïde" des écailles; ces auteurs constatent qu'elles contiennent quelquefois des aiguilles d'hydroxylapatite. Nos observations suggèrent que ces vésicules ont une origine cellulaire car d'une part elles sont entourées d'une membrane trilaminaire et d'autre part les cellules en contact avec le tissu "ostéoïde" renferment des vésicules ayant la même taille que celles observées dans le tissu "ostéoïde". Chez l'anguille, LOPEZ et coll. (1978) attribuent également une origine cellulaire aux vésicules observées lors d'une apposition secondaire au cours du remaniement osseux au niveau de l'os vertébral. Ces auteurs pensent qu'il y a une extrusion de vésicules préformées des cellules vers la matrice organique.

Les deux dispositions (en hélice ou au hasard) des

bâtonnets et des aiguilles minéraux entourant les fibrilles de collagène ont déjà été observées lors des phases initiales d'une calcification expérimentale (BOIVIN, 1975). La minéralisation intrafibrillaire a déjà été décrite dans divers tissus calcifiés (voir en particulier, GLIMCHER et KRANE, 1968; HÖHLING et coll., 1971).

L'origine des corpuscules de MANDL dans la couche interne n'est pas résolue. Des vésicules d'origine cellulaire n'ont pas été observées lors de la formation et développement des corpuscules. Ils sont peut-être formés par une nucléation hétérogène comme décrite par BACHRA (1972, 1975) dans des expériences "in vitro".

Corpuscules de MANDL

Examen en lumière polarisée

Dans l'écaille totale (trame organique + phase minérale), la biréfringence positive du collagène est trop forte et cache ainsi la biréfringence négative des calcifications sphériques. On a pu confirmer l'observation de SCHMIDT (1947a et b), puis SCHMIDT et KEIL (1971) qu'en éliminant la matière organique et en examinant l'écaille parallèlement à sa surface dans des liquides dont l'indice de réfraction est semblable à celui du dépôt minéral, la biréfringence négative des corpuscules apparaît. Le phénomène optique observé en lumière polarisée est un artefact probablement dû à la structure de la couche interne de l'écaille c'est-à-dire à la superposition des lamelles ainsi qu'à l'entrecroisement des fibres des différentes lamelles. Cette hypothèse est renforcée par le fait que les croix de polarisation disparaissent lorsqu'on examine les corpuscules de MANDL en coupes perpendiculaires à la surface de l'écaille.

Aspects ultrastructuraux

Les aspects ultrastructuraux des corpuscules varient chez les divers poissons, cependant une disposition radiaire des cristaux n'a jamais été observée. Au ME à balayage, les corpuscules, débarrassés de leur matière organique, montrent particulièrement bien la superposition des lamelles à texture différemment orientée. C'est cette superposition qui est la cause de l'apparition des croix de polarisation et non pas une orientation "sphéritique" des cristaux comme le pensaient SCHMIDT (1947a et b), puis SCHMIDT et KEIL (1971).

Aspects biophysiques

L'analyse par diffraction des rayons X et diffraction électronique réalisée sur le tissu calcifié de l'écaille et des corpuscules de MANDL met en évidence la présence d'apatite, ce qui confirme les premiers résultats obtenus sur les écailles, par diffraction des rayons X (MOSS, 1963). Contrairement aux affirmations de KATO (1953), les corpuscules ne contiennent pas de cristaux d'oxalate de calcium trihydrate. La diffraction d'un secteur de corpuscule isolé, ne révèle aucune orientation, ce qui s'oppose à l'hypothèse d'une disposition radiaire des cristaux dans un corpuscule.

Chez la perche soleil, le degré de minéralisation des corpuscules et de la couche interne de l'écaille sont semblables, ce qui soutient l'interprétation de BAUDELLOT (1873) sur la minéralisation de la couche interne par fusion progressive des corpuscules. Toutefois, chez certains poissons comme le guppy, la minéralisation de la couche interne s'étend bien qu'il n'y ait que peu ou pas de corpuscules de MANDL isolés. La signification de la présence et la formation des corpuscules de MANDL reste obscure.

La résorption expérimentale

Une résorption naturelle des bords des écailles existe chez certains poissons pendant les périodes de frai (BULLOCK et ROBERTS, 1975); par ailleurs OUCHI et coll. (1972) ont étudié une résorption naturelle dans l'écaille de saumon. Dans l'écaille de la ligne latérale du poisson rouge on a observé la résorption naturelle qui crée une gouttière où se loge le canal sensoriel. En outre on a constaté que 15% des poissons rouges et Tilapia, provenant de différents élevages, soumis ou non-soumis au régime rachitogène, montrent des zones de résorptions ostéoclastiques du tissu calcifié des écailles. Selon FROST (1973) il n'y a pas de remaniement osseux chez les petits animaux y compris les petits poissons Téléostéens. Pourtant un remaniment du tissu calcifié de l'écaille du poisson rouge a été observé au cours de nos examens. Dans le travail de IKEDA et coll. (1974), les images montrent aussi un remaniement du tissu calcifié de l'écaille des poissons rouges après une période de jeûne puis une reprise de la nutrition.

En général, il semble qu'un régime riche en strontium puisse provoquer un rachitisme. WALLIN (1957) constate l'état rachitique et résorption des écailles de gardon soumis au régime rachitogène. Nous avons constaté des bordures ostéoïdes élargies mais pas de résorption des écailles à la suite du régime rachitogène.

Un excès de thyroxine stimule directement la résorption ostéoclastique. La déminéralisation osseuse chez la truite est maximale lorsque l'animal est maintenu à jeun dans une eau dépourvue de calcium et contenant de la thyroxine 4 (LOPEZ, 1973). Nos résultats confirment que chez Tilapia, au niveau de l'écaille, la résorption est stimulée par la

thyroxine 4. Chez les poissons témoins, maintenus à jeun dans une eau déminéralisée additionnée de calcium, les écailles montrent une moindre résorption, mais celle-ci n'est pas négligeable si on la compare à la résorption minime observée chez les poissons provenant d'un élevage où l'apport minéral est assuré. Ceci confirme les résultats de IKEDA et coll. (1974) qui ont soumis des poissons rouges à un jeûne pendant une période allant jusqu'à 50 jours, et qui trouvent une résorption plus ou moins forte dans chacune des écailles examinées.

Une déminéralisation diffuse par halastisie (LOPEZ et coll., 1970) est peu probable car l'analyse infrarouge du dépôt minéral des écailles, n'a pas révélé de différences de cristallinité du minéral chez les animaux témoins et expérimentaux.

Chez les Poissons Téléostéens à os cellulaire, 3 formes de résorption du tissu osseux sont connues: la résorption ostéoclastique, la résorption par ostéolyse périostéocytaire et la déminéralisation par halastisie. Dans l'écaille, on trouve la résorption ostéoclastique, mais pas de résorption par ostéolyse périostéocytaire car il n'y a pas d'ostéocytes ou d'autres cellules incorporées dans le tissu calcifié de l'écaille, et jusqu'à présent une déminéralisation par halastisie n'a pas été constatée dans les écailles.

CONCLUSIONS

L'étude de la structure et de la minéralisation de l'écaille de quelques Téléostéens permet de tirer les conclusions suivantes:

- 1) dans l'écaille des Téléostéens la minéralisation est inotrope et s'effectue par l'intermédiaire de vésicules.
- 2) dans les corpuscules de MANDL, présents dans toutes les espèces étudiées, il n'y a pas de calcification sphérique vraie, avec disposition radiaire des cristaux de la substance minérale. Les croix de polarisation atypiques observées à leur niveau ne sont due qu'à la superposition des lamelles à texture différemment orientée. La calcification de ces corpuscules est inotrope mais sans intermédiaire vésiculaire décelable.
- 3) dans les tissus calcifiés de l'écaille des phénomènes de résorption sont observés prouvant ainsi que ces tissus constituent une réserve minérale mobilisable suivant les besoins de l'organisme.

BIBLIOGRAPHIE

1. BACHRA, B.N. : Calcification in vitro of demineralized bone matrix. *Calc. Tiss. Res.* 8, 287-303 (1972).
2. BACHRA, B.N. : Calcification of collagenous material in vitro as a model system for biological calcification. *In* : Calcium metabolism, bone and metabolic diseases, edited by F. Kuhlencordt and H. -P. Kruse pp. 164-169, Springer, Berlin (1975).
3. BAUD, C.A. : Radiographies et microradiographies osseuses quantitatives. *Praxis* 46, 329-331 (1957).
4. BAUDELLOT, E. : Recherches sur la structure et le développement des écailles des poissons osseux. *Arch. Zool. exp. gén.* 2, 87-244 et 429-480 (1873).
5. BLUMENTHAL, N.C., POSNER, A.S. and HOLMES, J.M. : Effect of preparation conditions on the properties and transformation of amorphous calcium phosphate. *Mat. Res. Bull.* 7, 1181-1190 (1972).
6. BOIVIN, G. : Etude chez le rat d'une calcinose cutanée induite par calciphylaxie locale. I. Aspects ultrastructuraux. *Arch. Anat. Microsc.* 64, 183-205 (1975).
7. BULLOCK, A.M. and ROBERTS, R.J. : The dermatology of marine teleost fish. I. The normal integument. *Oceanogr. mar. Biol. Ann. Rev.* 13, 383-411 (1975).
8. FROST, H.M. : "Bone remodeling and its relationship to metabolic bone diseases" pp. 28-53, Thomas, Springfield (1973).
9. GLIMCHER, M.J. and KRANE, S.M. : The organization and structure of bone and the mechanism of calcification. *In* : Treatise on Collagen, Vol. 2, Biology of Collagen, part B, edited by B.S. Gould pp. 68-251, Academic Press, London (1968).
10. HÖHLING, H.J., KREILOS, R., NEUBAUER, G. and BOYDE, A. : Electron microscopy and electron microscopical measurements of collagen mineralization in hard tissues. *Z. Zellforsch.* 122, 36-52 (1971).
11. IKEDA, Y., OZAKI, H. and YASUDA, H. : The effects of starvation and reduced diet on the growth of scales in goldfish. *Bull. Jap. Soc. sci. Fish.* 40, 859-868 (1974).
12. KATO, K. : Calcium oxalate and other calcium salts in fish scale. *Science Rep. Saitama Univ.* 1, 51-59 (1953).

13. KOBAYASHI, S., YAMADA, J. MAEKAWA, K. and OUCHI, K. :
Calcification and nucleation in fish-scales.
Biom mineralisation 6, 84-90 (1972).
14. LOPEZ, E. : Etude morphologique et physiologique de l'os
cellulaire des poissons téléostéens. Mém. Mus.
Nat. d'Histoire Naturelle, Série A. 80, 1-90
(1973).
15. LOPEZ, E., LEE, H. and BAUD, C.A. : Etude histophysique
de l'os d'un Téléostéen Anguilla anguilla L. au
cours d'une hypercalcémie provoquée par la
maturation expérimentale. C.R. Acad. Sc. Paris
270, 2015-2017 (1970).
16. LOPEZ, E., BAUD, C.A., BOIVIN, G. and LALLIER, F. :
Etude ultrastructurale, chez un poisson téléostéen
l'anguille (Anguilla anguilla L.) des processus
de minéralisation dans les cas d'une ossification
périchondrale de l'arc branchial et d'une
apposition secondaire dans l'os vertébral. Ann.
Biol. anim. Bioch. Biophys. 18, 105-117 (1978).
17. MOSS, M.L. : The biology of acellular teleost bone.
Ann. N.Y. Acad. Sci. 109, 337-350 (1963).
18. OUCHI, K., YAMADA, J. and KOSAKA, S. : On the resorption
of scales and associated cells in precocious male
parr of the Masu salmon (Oncorhynchus masou).
Bull. Jap. Soc. sci. Fish. 38, 423-430 (1972).
19. SCHMIDT, W.J. : Das Wesen der Mandlschen Körperchen in
den Teleosteerschuppen, ein Beitrag zum Ver-
ständnis der Kalkabscheidung bei der Bildung
knochenartiger Gewebe. Z. Naturforsch. 2b,
233-238 (1947a).
20. SCHMIDT, W.J. : Über homogene und sphäritische Verkalkung
bei den verschiedenen Arten des Knochengewebes.
Naturwiss. 9, 273-277 (1947b).
21. SCHMIDT, W.J. and KEIL, A. : "Polarizing Microscopy of
Dental Tissues" pp. 51-469, Pergamon, Oxford (1971).
22. SISSONS, H.A., JOWSEY, J. and STEWART, L. : Quantitative
microradiography of bone tissue. In : "X-ray
Microscopy and Microanalysis" Proc. 2nd intern.
symp. edited by A. Engström, V.E. Cosslett and
H.H. Pattee pp. 199-205, Elsevier Publishing Co.,
Amsterdam (1960).
23. WALLIN, O. : On the growth structure and developmental
physiology of the scale of fishes. Rep. Inst.
Freshw. Res., Drottningholm 38, 385-447 (1957).

